

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.14.012

# 工业园含氟废水/综合废水分步治理工程设计

谭周权

(兰州市城市建设设计院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对绵阳市高端制造产业集中发展区废水含氟浓度高,有机物难以降解,氮、磷、SS处理要求较高的特点,吴家工业污水处理厂预先采用异核结晶混凝沉淀/吸附/离子交换组合工艺单独处理含氟废水,然后与其他废水合并一起采用水解酸化/多级多段AO/高效沉淀/深床滤池/臭氧接触工艺处理。分步进行针对性处理,可节省运行费用,且工艺布置合理、技术先进、集约化程度高。本项目设计规模为 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,当综合废水实际处理量平均值为 $35\,520\text{ m}^3/\text{d}$ 时,出水污染物指标浓度优于排放标准。本工程直接运行成本为 $4.2\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

**关键词:** 含氟废水; 综合废水; 运行成本

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)14-0071-06

## Design of a Stepwise Project for the Treatment of Fluorine Containing Wastewater/Comprehensive Wastewater in an Industrial Park

TAN Zhou-quan

(Lanzhou Urban Construction Design Institute, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The wastewater from Mianyang high-end manufacturing industry concentrated development area contains high concentration of fluorine and refractory organic matter, and there are high requirements for nitrogen, phosphorus and SS treatment. In Wujia industrial wastewater treatment plant, a combined process consisting of heteronuclear crystallization coagulation precipitation, adsorption and ion exchange was employed to treat the fluorine containing wastewater separately, and then combined with other wastewater to be treated by a process consisting of hydrolytic acidification, multi-stage A/O, high efficiency precipitation, deep bed filter and ozone contact reactor. The stepwise treatment of different wastewater saved the operating cost, optimized the process layout, with advanced technology and high degree of intensification. The design scale of the project is  $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ . When the actual average treatment scale of the comprehensive wastewater was  $35\,520\text{ m}^3/\text{d}$ , the pollutant concentration in the effluent was lower than the discharge standard. The direct operating cost of the project is  $4.2\text{ yuan}/\text{m}^3$ .

**Key words:** fluoride containing wastewater; comprehensive wastewater; operating cost

绵阳市高端制造产业集中发展区位于绵阳市涪城区,规划总面积约 $673.62\text{ hm}^2$ ,园区以新型平板显示、新能源、汽车和零部件及新材料为主导产业。为配套园区基础设施,新建吴家工业污水处理厂,该项目选址于绵阳市涪城区吴家镇凤凰村6组,设计规模为 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,建设内容包括厂区红线内的主

体工程和辅助工程,总投资约4亿元,征地面积 $5\text{ hm}^2$ ,近期服务范围为高端制造产业集中发展区、吴家镇片区。

### 1 工程设计

#### 1.1 设计水量、水质

根据相关规划,近期预计吴家镇工业园片区人

口共计6万人,预测生活污水产生量为5 760 m<sup>3</sup>/d,通过对集中发展区内的现有企业和近期拟入驻企业的废水排放情况进行收集调查,可知发展区排放含氟废水28 650 m<sup>3</sup>/d,其他工业废水3 415.5 m<sup>3</sup>/d,受纳废水量合计为37 825.5 m<sup>3</sup>/d。考虑处理余量和污水变化系数,本项目设计规模为4×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,其中含氟废水设计处理能力为3×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,其他废水(生活污水和其他工业废水)设计处理能力为1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。

根据入驻惠科股份有限公司提供的第8.6代液晶面板项目生产废水资料,生产排水中所含特征污染物包括总磷、氟化物、银、铜、锌,生产、生活废水排放量约28 650 m<sup>3</sup>/d。由于本项目出水标准对总氟要求较高,根据集中发展区规划和环保要求,吴家工业污水厂需要对28 650 m<sup>3</sup>/d的含氟废水进行单独处理后再与其他废水一起进行处理。其他企业工业废水和总片区生活污水经预处理后达到《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)后再排入吴家工业污水处理厂处理。吴家工业污水处理厂处理后的尾水经提升泵站提升后最终引至涪江。

根据绵阳市环境保护局环保要求,设计出水COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、TN需达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)中工业园区集中式污水处理厂排放标准限值;TP达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类标准;氟化物控制指标为1.5 mg/L;其余指标达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A标准限值。具体设计指标见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

mg·L<sup>-1</sup>

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	氨氮	TN	TP	F <sup>-</sup>
含氟废水进水	500	300	400	45	70	8.0	15
其他废水进水	300	160	220	40	55	6.5	0
混合进水	450	265	355	43.8	66.3	7.63	11.3
出水	40	10	10	3	15	0.2	1.5

## 1.2 工艺选择

目前处理含氟废水的主流工艺是异核结晶混凝沉淀技术,可去除污水中大部分氟化物和磷酸盐。该技术可使水中污染物发生化学反应、核化、晶体成长、聚结后形成比传统混凝沉淀更密实的絮体,难以溶解<sup>[1-2]</sup>。根据相关研究和工程实践,该技

术处理后的出水氟离子浓度不低于8 mg/L<sup>[3]</sup>,还需要采用除氟剂吸附处理,处理后出水氟离子浓度仍不能保证在1.5 mg/L以下<sup>[4]</sup>,因此还需通过离子交换树脂对此类废水进一步处理最终可保证达标排放。离子交换法主要采用阴离子交换树脂,本项目采用碱洗法作为阴离子交换树脂再生处理工艺<sup>[4]</sup>。

根据对惠科公司生产废水水质成分的分析,构成废水中COD的成分中有大量有机氮、有机硫、光阻液高分子等难生物降解物质,以及季铵盐、TMAH等对微生物有强烈抑制作用的物质,TMAH的稳定结构影响了BOD<sub>5</sub>/COD的比值,并造成废水容易进行生化处理的假象<sup>[5-6]</sup>,因此本项目工业废水可生化性不足,并且进水总氮、总磷浓度较高,需要设置水解酸化工艺提高可生化性。二级生化处理主体工艺选用多级多段AO工艺,它比SBR、氧化沟、A<sup>2</sup>O工艺除磷脱氮程度高,更适用于对出水氮磷指标要求严格的工程<sup>[7]</sup>。

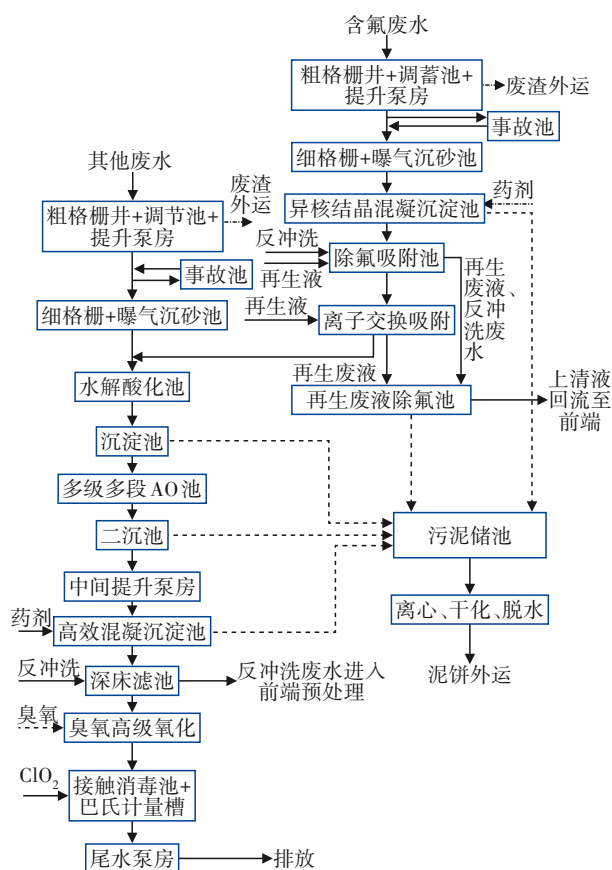
二级处理后的出水,BOD<sub>5</sub>、SS去除率不能满足本工程治理需要,TP也难以达到0.2 mg/L,因此需要增加污水深度处理设施。采用高效沉淀池可进一步去除SS和TP,也可去除小部分BOD<sub>5</sub>、COD;再采用深床滤池处理工艺截留去除SS、化学微絮凝去除TP、生物反硝化去除TN<sup>[8]</sup>;最后采用臭氧氧化技术对难降解有机物做最终降解以保证COD、BOD<sub>5</sub>的达标排放。

## 1.3 工艺流程

综上,先对含氟废水进行“异核结晶混凝沉淀/吸附/离子交换”组合工艺处理;再对混合废水采用“水解酸化/多段多级AO/高效混凝沉淀/深床滤池/臭氧高级氧化/接触消毒”工艺处理,最终保证废水稳定达标排放。本工程选用二氧化氯消毒工艺,污泥处理采用离心脱水一体机,脱水污泥经鉴定无害后送往城市生活垃圾填埋场进行卫生填埋。具体工艺流程见图1。

厂区布置功能分区明确,各项用地合理,流程力求简短、顺畅,避免迂回重复,充分体现了集约化设计。

针对该工业区废水污染物成分复杂的情况,本工程先设计了含氟废水集中去除含氟污染物的工艺,通过选用技术十分成熟的组合工艺,确保在除氟阶段、二级生化处理和深度处理阶段的运行效果,具有分步性、针对性、技术成熟的特点。



### 图1 废水处理工艺流程

**Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process**

## 2 工程设计参数

污水厂含氟废水处理系统构筑物、设备均按 $3\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 规模建设,污水变化系数1.45,平均流量为 $1\,812.5\text{m}^3/\text{h}$ ;其他工业废水和生活污水预处理系统构筑物、设备均按 $1\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 规模建设,污水变化系数1.58,平均流量为 $417\text{m}^3/\text{h}$ ;混合废水处理工艺按 $4\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 规模建设,污水变化系数1.4,平均流量为 $1\,667\text{m}^3/\text{h}$ 。

## 2.1 含氟废水处理

### ① 粗格栅井、调节池、提升泵房、事故池

粗格栅井1座,尺寸为9.9 m×3.2 m×3.6 m,与调节池合建。设计单渠宽为1 300 mm,渠道2条,配有机械格栅除污机2套。调节池1座,尺寸为61.5 m×23 m×9.5 m,停留时间8 h,有效水深7 m,配有调节池风机3台(2用1备);污水提升泵房配有潜污泵3台(2用1备)。事故池1座,尺寸为61.5 m×20.6 m×9.5 m,停留时间7 h,配有潜污泵3台(2用1备)。

### ② 细格栅井、曝气沉砂池

细格栅井1座,尺寸为14.4 m×4.6 m×2.1 m,渠

道3条,渠宽为1 200 mm,配有网板格栅除污机3台。曝气沉砂池1座,尺寸为13.6 m×7.6 m×6.65 m,水力停留时间为5.0 min,单位曝气量为 $0.2\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,配有桥式吸砂机1台、气提压缩机2台、砂水分离器1台、罗茨鼓风机3台(2用1备)。

### ③ 异核结晶混凝沉淀池

1座,分2组,设两级混凝反应沉淀池,与吸附车间合建。一、二级池尺寸均为 $22.2\text{ m}\times 16.4\text{ m}\times 6\text{ m}$ 。一级混合池、混凝池、絮凝池的停留时间均为 $15\text{ min}$ ,一级沉淀池表面负荷 $2.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。二级混合池、混凝池、絮凝池的停留时间均为 $20\text{ min}$ ,二级沉淀池表面负荷 $2.2\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。一级、二级混凝沉淀池各配有混合搅拌器4台, $N=0.37\text{ kW}$ ;絮凝反应搅拌器各2台, $N=0.37\text{ kW}$ ;污泥回流泵7台(6用1备), $Q=6.6\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=200\text{ kPa}$ ;氟离子在线分析仪2套。

#### ④ 除氟吸附车间

1座,分2组,其中池体部分尺寸为 $32.8\text{ m}\times 13\text{ m}\times 6.5\text{ m}$ ,房间部分为 $32.8\text{ m}\times 14.8\text{ m}\times 5.5\text{ m}$ 。另建有pH调节池1座,尺寸为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 3\text{ m}$ ,与吸附车间合建,停留时间为 $30\text{ s}$ 。吸附车间备一体化吸附填料活性氧化铝 $600\text{ t}$ ,填料粒径 $1\sim 3\text{ mm}$ ,除氟量约为 $2\sim 3\text{ mg/g}$ ,静态吸附容量 $\geq 16.8\%$ ,吸附周期为 $24\text{ h}$ ;反冲洗强度为 $15\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ ,反冲洗历时 $20\text{ min}$ ;再生液为硫酸铝溶液,用量为填料用量的2倍,再生时间 $2\text{ h}$ 。配有反洗泵4台(3用1备), $Q=500\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=90\text{ kPa}$ ;再生泵3台(2用1备), $Q=250\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=90\text{ kPa}$ ;排水泵2台(1用1备), $Q=250\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=80\text{ kPa}$ 。

⑤ 含氟废水离子交换车间

1座,分2组,尺寸为 $26.2\text{ m}\times 20\text{ m}\times 7\text{ m}$ 。在离子交换车间内另建pH调节池1座,分2组,尺寸为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 3\text{ m}$ ,停留时间30 s。除氟离子交换树脂 $59\text{ m}^3$ ,全交换容量 $3.6\text{ mmol/g}$ (干),采用碱洗法将浓度为4%的约树脂体积2~3倍量的NaOH逆流通过树脂床,通过时间约为60 min,再生液流速 $4\sim 6\text{ m/h}$ 。配有圆筒式离子交换器7台(6用1备),直径 $3\,200\text{ mm}$ ,高度 $5\,000\text{ mm}$ ;树脂捕捉器7台(6用1备),DN250;再生水泵2台, $Q=35\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=400\text{ kPa}$ ;碱液计量箱1台, $V=3\text{ m}^3$ ,Q235B衬胶;卸碱泵1台, $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=100\text{ kPa}$ ;提升泵4台(3用1备), $Q=556\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=140\text{ kPa}$ 。

### ⑥ 再生废液除氟池

1座,尺寸为8 m×8 m×4 m,主要用于反冲洗废液、再生废液的储存和初步处理。配有混合搅拌机2台, $N=3$  kW。

## 2.2 其他废水预处理

### ① 粗格栅井、调节池、污水提升泵房、事故池

粗格栅井1座,与调节池合建,尺寸为9.9 m×2.2 m×3.5 m,单渠宽800 mm,渠道数量2条,配有机械格栅除污机2套。调节池1座,尺寸为61.8 m×7.6 m×9.5 m,配有调节池风机3台(2用1备)。污水提升泵房配有污水潜污泵3台(2用1备)。事故池1座,尺寸为31.5 m×20.6 m×5.5 m,停留时间7 h,配有潜污泵2台(1用1备)。

### ② 细格栅井、废水曝气沉砂池

细格栅井1座,尺寸为14.4 m×2.6 m×2.1 m,渠道数量2条,配有网板格栅除污机2台。曝气沉砂池1座,尺寸为7.7 m×5.6 m×6.65 m,水力停留时间5.0 min,有效水深2.0 m,单位曝气量 $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,配有桥式吸砂机1台、气提压缩机2台、砂水分离器1台、罗茨鼓风机2台(1用1备)。

## 2.3 混合废水处理

### ① 水解酸化池、沉淀池

1座,分2组,尺寸为51 m×44 m×7 m,停留时间8 h,配有搅拌器8台, $N=7.5$  kW。沉淀池1座,分3组,尺寸为51 m×23.8 m×4.6 m,沉淀区域负荷 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,配有桁车吸泥机1台, $N=0.75$  kW;剩余污泥泵3台(2用1备), $Q=44 \text{ m}^3/\text{h}$ ;污泥回流泵4台(3用1备), $Q=560 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=30$  kPa。

### ② 多段多级AO生化池

1座,总体尺寸为86.3 m×78.4 m×8.0 m,有效水深7 m,由厌氧段和三段缺氧/好氧排列组成,总水力停留时间26 h(其中厌氧区1 h、总缺氧区8 h、总好氧区17 h)。设计水温 $12\sim 25$  °C,混合液浓度 $4.0 \text{ gMLSS/L}$ ,污泥负荷 $0.062 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ ,硝化负荷 $0.022 \text{ kgNH}_3\text{-N}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ ,反硝化负荷 $0.039 \text{ kgTN}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ ,污泥回流比50%~100%,泥龄14.6 d,剩余泥量 $8.0 \text{ t/d}$ 。采用微孔鼓风曝气充氧,所需总供风量为 $223 \text{ m}^3/\text{min}$ (气水比8:1),空气管道采用不锈钢管。配有缺氧池推流器16台(14用2备), $N=5.5$  kW;厌氧搅拌器5台(4用1备), $N=2.2$  kW;曝气盘5 600套,盘式微孔曝气器,氧转移率 $\geq 28\%$ ,单盘气量 $\geq 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ;混合液回流泵7台(6

用1备), $Q=833 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=10$  kPa, $N=5.5$  kW;剩余污泥泵3台(2用1备), $Q=60 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=150$  kPa, $N=4$  kW;出水筛网8套, DN1 000,  $L=7$  m;布水器9套, DN600;填料 $2 840 \text{ m}^3$ 。

### ③ 二沉池、污泥泵房、配水井、中间提升泵房

二沉池设2座,直径×高=30 m×4.6 m,沉淀区域负荷 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,每座配有周边传动刮吸泥机各1台,  $\varnothing 30 \text{ m}$ , $N=0.55$  kW。污泥泵房与多段多级AO生化池合建,配有污泥泵4台, $Q=556 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=30$  kPa, $N=7.5$  kW。配水井尺寸为6 m×3 m×3.0 m,中间提升泵房尺寸为21.4 m×4 m×7.5 m,配有潜污泵4台(3用1备), $Q=556 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=80$  kPa。

### ④ 高效沉淀池

1座,尺寸为26.0 m×25 m×7 m,包括1个混合池、2个反应池、2个沉淀池。混合池的混合时间3.0 min,絮凝池的反应时间10~15 min,表面负荷 $10.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,污泥回流比4%,斜管填料 $192 \text{ m}^3$ 。配有混合搅拌机1台, $N=7.5$  kW;絮凝搅拌机2台, $N=5.5$  kW;高效反应桶2台;浓缩刮泥机2台,直径10 m, $N=0.75$  kW;污泥回流泵(螺杆泵)3台(2用1备), $Q=34 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=200$  kPa, $N=11$  kW;剩余污泥泵(螺杆泵)3台(2用1备), $Q=34 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=200$  kPa, $N=11$  kW;泵坑排污泵1台。

### ⑤ 深床滤池

1座,分4组,总体尺寸为40 m×21.4 m×6.91 m,区域上房间尺寸为21 m×13.4 m×5.5 m,单池尺寸为18.29 m×3.6 m×6.91 m。水力负荷 $5.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,水反冲强度(推荐) $15.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,空气反冲强度(推荐) $92.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,洗砂废水排放 $\leq$ 总进水量的3%,滤料厚度2 500 mm,2.0~4.0 mm粒径石英砂滤料,承托层高度450 mm,单池过滤面积 $36.75 \text{ m}^2$ ,单池滤料体积 $544 \text{ m}^3$ 。

### ⑥ 臭氧氧化池

1座,接触池尺寸为22 m×7 m×6.5 m,发生间尺寸为20.4 m×12 m×5 m,总停留时间0.5 h,设计浓度 $15 \text{ mg/L}$ 。配有臭氧发生器2台,每台臭氧发生量 $12.8 \text{ kg/h}$ 。

### ⑦ 接触消毒池、尾水泵房

接触消毒池1座,尺寸为22 m×7 m×4.2 m,停留时间30 min,巴氏计量槽1套,喉宽0.45 m,量程4.5~630 L/s,含配套流量计。尾水泵房尺寸为34.2 m×17.3 m×8 m,内部清水池尺寸为34.2 m×5 m×5

m。配有尾水泵 4 台(3 用 1 备),  $Q=556 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=600 \text{ kPa}$ ; 中水机组 1 台,  $Q=150 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=400 \text{ kPa}$ 。

### ⑧ 鼓风机房、加药间

鼓风机房尺寸为  $40 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ , 配有生化池曝气鼓风机 4 套(3 用 1 备), 气水比 8:1, 单套风量  $75 \text{ m}^3/\text{min}$ , 风压为  $85 \text{ kPa}$ 。

加药间 1 座, 尺寸为  $45 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ , 其中异核结晶混凝剂投加量按  $200 \text{ mg/L}$  (PAC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量约 28%) 设计, 异核结晶絮凝剂 PAM 投加量按  $6.6 \text{ mg/L}$  设计, 投加浓度为 0.1%; 氯化钙投加量按  $60 \text{ mg/L}$  设计(无水氯化钙); 硫酸铝投加量按  $250 \text{ mg/L}$  设计(粉末, 含量  $\geq 16\%$ ); 烧碱投加量按  $80 \text{ mg/L}$  (30% 含量) 设计; 硫酸投加量按  $250 \text{ mg/L}$  (液体, 10% 含量) 设计。加药间配套全自动加药计量泵、药剂制备系统、投加系统等。

### ⑨ 污泥储池、污泥脱水干化间

储泥池尺寸为  $12 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ , 清水池尺寸(与污泥池合建)为  $4 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ , 污泥储池停留时间

30 min。脱水机房尺寸为  $60 \text{ m} \times 27 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$ , 絮凝剂(聚丙烯酰胺)设计投加量  $3.5 \sim 5.0 \text{ kg/tDS}$ , 投加浓度 0.1%, 配套加药泵 6 台,  $Q=2000 \text{ L/h}$ ; 离心脱水机(有机)3 台(2 用 1 备), 处理能力  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ; 离心脱水机(无机)5 台(4 用 1 备), 处理能力  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ; 配套冲洗水泵、进泥螺杆泵等。

## 3 运行效果

吴家工业污水处理厂工程于 2020 年 8 月开始启动运行, 在试运行期主要调试了含氟废水处理段、二级生化处理段设备运行参数, 并对多级多段 AO 生物池进行了污泥驯化, 深度处理、污泥处理段设备也得到快速调试。2021 年 1 月开始正式运营, 2021 年 1 月 1 日—3 月 31 日混合废水处理量基本在  $30840 \sim 37700 \text{ m}^3/\text{d}$ , 平均处理量  $35520 \text{ m}^3/\text{d}$ , 进、出水水质见表 2。可见, 当含氟废水进水  $\text{F}^-$  平均浓度为  $13.3 \text{ mg/L}$  时, 平均出水浓度为  $1.0 \text{ mg/L}$ , 达到排放标准, 其他指标也优于设计标准, 实现了工业园废水的高效处理。

表 2 正式运行各阶段污染物浓度平均值

Tab.2 Average concentration of pollutants in each stage during formal operation

项 目		COD	BOD <sub>5</sub>	SS	氨氮	TN	TP	F <sup>-</sup>
含氟废水进水/(mg·L <sup>-1</sup> )		488	287	375	44.4	65.1	7.8	13.3
预处理	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	446	264	311	43.1	64.5	7.6	13.3
	去除率/%	8.6	8.0	17.1	2.9	0.9	2.6	0
异核结晶混凝沉淀池	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	354	242	64	42.6	63.8	3.7	7.8
	去除率/%	20.6	8.3	79.4	1.2	1.1	51.3	41.4
除氟吸附池	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	354	242	43	42.6	63.8	3.5	1.6
	去除率/%	0	0	32.8	0	0	5.4	79.5
离子交换	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	354	242	43	42.6	63.8	3.5	1.3
	去除率/%	0	0	0	0	0	0	18.8
其他废水进水/(mg·L <sup>-1</sup> )		279	153	206	37.9	53.8	6.1	0
预处理	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	254	144	131	36.4	52.5	6.0	0
	去除率/%	9.0	5.9	36.4	4.0	2.4	1.6	
混合废水进水/(mg·L <sup>-1</sup> )		329	215	65.8	41.1	61.0	4.1	1.0
水解酸化池	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	296	196	43.3	40.1	60.3	4.1	1.0
	去除率/%	10.2	8.9	34.2	2.4	1.1	0	0
多级多段 AO+沉淀池	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	41	12	15.4	4.2	7.6	1.8	1.0
	去除率/%	86.1	93.9	64.4	89.5	87.4	56.1	0
高效沉淀池	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	39	8	4.9	4.1	7.5	0.3	1.0
	去除率/%	2.5	11.1	68.2	2.4	1.3	83.3	0
深床滤池	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	39	8	1.8	2.2	5.8	0.1	1.0
	去除率/%	0	0	63.3	46.3	22.7	66.7	0
臭氧接触池	出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	32	5	1.8	2.0	5.7	0.1	1.0
	去除率/%	17.9	37.5	0	9.1	1.7	0	0

#### 4 经济效益分析

本项目总投资为38 650万元,资金全部由建设单位自筹解决。通过对污水处理厂近期工程项目财务分析,所得税前、后财务内部收益率分别为8.91%、7.13%,高于行业基准收益率(5%);所得税前、后投资回收期分别为12.23、14.61 a,低于行业基准回收期(18 a左右)。本项目单位运营成本为4.2元/m<sup>3</sup>。

#### 5 结论

① 绵阳市吴家工业污水处理工程,首先对含氟废水采用预处理/异核结晶混凝沉淀/吸附/离子交换组合工艺进行处理,然后与其他废水合并一起采用水解酸化/多级多段AO/高效沉淀/深床滤池/臭氧接触池进行处理,实施分步治理,实现出水达标排放。

② 当本工业区综合废水实际处理量平均值为35 520 m<sup>3</sup>/d时,出水指标优于相应排放要求。本工程总投资为38 650万元,直接运行成本为4.2元/m<sup>3</sup>。

③ 整个工艺设计科学严谨、技术先进、集约化、自动化程度高,对含氟废水、工业园综合污水处理具有借鉴作用。

#### 参考文献:

- [1] 金月清,曾旭. 两级沉淀法处理液晶面板生产中含氟废水的研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 109-112.  
JIN Yueqing, ZENG Xu. Treatment of fluoride wastewater in liquid crystal panel production by two-stage precipitation method [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 109-112(in Chinese).
- [2] 姜科,周康根. 晶种诱导絮凝深度处理工业含氟废水[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(10): 74-76, 96.  
JIANG Ke, ZHOU Kanggen. Advanced treatment of industrial fluorine-containing wastewater by seed induced coagulation process [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(10): 74-76, 96(in Chinese).
- [3] 李喜林,张颖,曹娟,等. 氟化工产业园区污水处理工程实例[J]. 水处理技术, 2019, 45(4): 135-138.

- LI Xilin, ZHANG Ying, CAO Juan, *et al.* Engineering project of sewage treatment in fluorine chemical industry park [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(4): 135-138(in Chinese).
- [4] 赵迎新,宋倩,马同宇,等. 改性/新型氟吸附材料的研究进展[J]. 工业水处理, 2018, 38(5): 9-14.  
ZHAO Yingxin, SONG Qian, MA Tongyu, *et al.* Research progress in the modified/novel fluoride adsorbing materials [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(5): 9-14(in Chinese).
- [5] HU T H. Biological treatment of TMAH (tetra-methyl ammonium hydroxide) in a full-scale TFT-LCD wastewater treatment plant [J]. Bioresource Technology, 2012, 113: 303-310.
- [6] 张红,黄建,鞠兴华,等. 工业废水对不同污水处理厂生化工艺段的影响[J]. 工业水处理, 2019, 39(12): 29-32.  
ZHANG Hong, HUANG Jian, JU Xinghua, *et al.* Effects of industrial wastewater on biological processes in different municipal wastewater treatment plants [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(12): 29-32(in Chinese).
- [7] 岳志芳,杨海燕,闫永利,等. 水解/多段多级AO/曝气生物滤池处理开发区污水[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 107-111.  
YUE Zhifang, YANG Haiyan, YAN Yongli, *et al.* Treatment of wastewater from a development zone by hydrolysis acidification/multi-stage and multi-level AO/biological aerated filter process [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 107-111(in Chinese).
- [8] 王杰,陈钰,刘颖,等. 倒置A<sup>2</sup>/O+反硝化深床滤池在城市污水处理厂中的应用[J]. 水处理技术, 2020, 46(6): 130-133.  
WANG Jie, CHEN Yu, LIU Ying, *et al.* Application of reversed AAO/denitrification biofilter in a municipal sewage treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(6): 130-133(in Chinese).

作者简介:谭周权(1985- ),男,重庆人,硕士,高级工程师,从事污水处理工程设计工作。

E-mail: 2755976956@qq.com

收稿日期: 2021-05-28

修回日期: 2021-06-29

(编辑:孔红春)